

Dünya Çapında Offshore Rüzgar Türbinleri ve Yeniden Tasarlanmış Bir Offshore Rüzgar Türbini

Turgut Keçici¹, İlyas Özer²

¹ *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Turkey, turgutkecici@ogr.bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0056-2033*

² *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Turkey, iozer@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2112-5497*

Rüzgar, binlerce yıldır insanlık için bir enerji kaynağı olmuştur. Geçmişte rüzgar enerjisi daha çok tarım alanında kullanılmıştır. Elektriğin keşfedilmesi ile birlikte insanoğlu elektrik üretebilecek yeni enerji kaynakları bulmaya çalışmıştır. Avrupa'da daha çok tarım alanında kullanılan rüzgar turbinlerinin elektrik üretmek için kullanabileceğinin anlaşılmasıından sonra rüzgar enerjisi elektrik üretmek için kullanılmaya başlamıştır. Günümüzün ve gelecek için önemli bir mühendislik sorunu alternatif enerji kaynakları bulmak ve geliştirmektir. Rüzgar enerjisi ise düşük karbon emisyonlu bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Son yıllarda kara üzerine kurulu rüzgar turbinleri ile birlikte açık deniz üzerine kurulu deniz üstü rüzgar turbinlerinin sayısı artmaktadır. Açık deniz üzerinde bulunan rüzgar, düşük karbonlu bir toplum bağlamında enerji endüstrisi için büyük potansiyel değere sahip temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Açık deniz rüzgar turbinlerinin temelleri, açık deniz rüzgar turbini tasarımlındaki ana zorluklardan birini oluşturmaktadır. Bu makalede, dünya üzerinde kurulu açık deniz rüzgar turbinleri ve kurulu güç kapasitesini, açık deniz rüzgar turbinlerinin çeşitlerini, gelecekte kurulması planlanan deniz üstü rüzgar turbini kapasitesini ve 3 boyutlu tasarımları yapılmış bir deniz üstü rüzgar turbinin statik analizi yapılacaktır. Monopile tipi bir 3 boyutlu deniz üstü rüzgar turbini tasarımları yapılmıştır. Bu çalışmada monopile tipi rüzgar turbinlerinde bulunan geçiş parçası klasik tasarımlarının aksine üretilebilirlik, maliyet, montaj süreleri ve ulaşım konuları dikkate alınarak yeniden tasarlanmıştır. Bu sayede klasik tasarımlarda yaşanan, geçiş parçasının tek parça olarak nakliyesinin ve kurulumunun getirdiği dezavantajlar ortadan kaldırılmıştır. Önerilen tasarım üzerinde yapılan analizlerde 1687 ton statik yük altında maksimum 180 Mpa stress değeri ve maksimum 3,1 mm yer değiştirmeye görülmüştür.

Keywords: *Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri, Monopile, Offshore, Rüzgar Türbinleri, Transition Piece.*

© 2022 Published by *AIntelia*

Offshore Wind Turbines Worldwide And A Redesigned Offshore Wind Turbine

Turgut Keçici¹, İlyas Özer²

¹ *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Turkey, turgutkecici@ogr.bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0056-2033*

² *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Turkey, iozer@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2112-5497*

Wind has been an energy source for humanity for thousands of years. In the past, wind energy was mostly used in agriculture. With the discovery of electricity, mankind has tried to find new energy sources that can produce electricity. After it was understood that wind turbines, which are mostly used in agriculture in Europe, could be used to generate electricity, wind energy began to be used to generate electricity. An important engineering problem for today and the future is to find and develop alternative energy sources. Wind energy is a renewable energy source with low carbon emissions. In recent years, the number of offshore wind turbines installed on the open sea has been increasing together with the wind turbines installed on land. Located offshore, wind is a clean, renewable energy source with great potential value for the energy industry in the context of a low-carbon society. The fundamentals of offshore wind turbines pose one of the main challenges

in offshore wind turbine design. In this article, offshore wind turbines installed in the world and their installed power capacity, types of offshore wind turbines, offshore wind turbine capacity planned to be installed in the future and a static analysis of an offshore wind turbine with a 3D design will be made. A monopile type 3D offshore wind turbine was designed. In this study, the transition piece in monopile type wind turbines has been redesigned considering manufacturability, cost, assembly times and transportation issues, contrary to their classical designs. In this way, the disadvantages of transporting and installing the transition piece as a single piece, which are experienced in classical designs, are eliminated. In the analyzes made on the proposed design, a maximum stress value of 180 Mpa and a maximum displacement of 3.1 mm were observed under a static load of 1687 tons.

Keywords: *Monopile, Offshore, Offshore Wind Turbines, Transition Piece, Wind Turbines.*

1. Giriş

İnsanoğlunun varlığından itibaren farklı amaçlarda kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Geçmiş dönemlerde yelkenli teknelerde, eski değirmenlerde mısır ve buğday öğütmekte kullanılan rüzgar enerjisi günümüzde elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerin gelişmesinde önemli bir yapıtaşısı olan yel değirmenleri elektirigin keşfedilmesi ile birlikte eski kullanım alanlarının aksine elektrik enerjisi elde edebilmek için kullanılabilceği anlaşılmıştır. Yel değirmenlerinin ilk kullanım alanı mısır ve buğday öğütmek için kullanılmıştır. Daha sonra yel değirmenleri tarım arazilerinin sulanması amacıyla kullanılmıştır.

Rüzgarın fizik davranışları büyük zamansal ve mekansal değişkenlik gösterir. Meteorolojide rüzgar, itici gücü dünya yüzeyinin düzensiz ısınması ve soğuması olan hareket halindeki havadır. Havanın yeryüzüne paralel yatay hareketi, en sık değişen rüzgarın hem yön hem de büyülükte bir ölçüsüdür. Sonuç olarak, hem rüzgar yönü hem de hızındaki rastgele değişiklik nedeniyle rüzgar tahmini çok zordur. Bu değişkenlik, rüzgar enerjisine bir başka ölçü önemi katmaktadır. Rüzgar enerjisi, enerji teknolojisi için benzersiz özelliklere sahiptir. [1]

Günümüzde rüzgar türbinleri kara üzerine kurulu ve deniz üzerine kurulu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Deniz üzerine kurulu rüzgar türbinlerini sayısının artmasında deniz üzerinde esen rüzgarın kara üzerinde esen rüzgardan daha güçlü ve verimli olmasından kaynaklanmaktadır. Deniz üstü rüzgar türbinleri ilk olarak kıyıdan 10km uzaklıktta ve derinliği ise 10m'yi geçmeyecek şekilde kurulmaya başlanmıştır. İlk deniz üstü rüzgar çiftliği 5 MW güçle Danimarka'da Lolland adası yakınlarında kurulan Vindeby rüzgar çiftliğidir. Diğer ülkeler (İngiltere, İsveç) ile birlikte Avrupa'da şu anda 12MW'lı offshore santrali çalışır durumdadır. Ve Avrupa bu kurulu gücünü 180MW'a çıkarmayı planlamaktadır. 2030 yılında ise Avrupa da rüzgar enerjisi kurulu gücünün %25'ini Offshore RT'lerinin oluşturacağı beklenmektedir. [2]

Günümüzde birçok açık deniz rüzgar türbini (OWT) teknolojisi, 2010 ve 2018 yılları arasında yüksek teknoloji hazırlık seviyesine ulaştı ve açık deniz rüzgar projelerinin seviyelendirilmiş enerji maliyetinde (LCOE) %20'lik önemli bir düşüş gözlemlendi. Böyle bir düşüş, daha büyük rotor çapı, deniz üstü rüzgar türbinleri kümleme etkisi ve gelişmiş rüzgar türbini teknolojisi ve kurulum teknolojisi gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. [3]

Tüm dünyada ekonominin ve kentleşmenin hızla gelişmesi nedeniyle elektrik enerjisine olan talep ölçüde artış göstermektedir. 2016 yılı sonunda, dünya genelinde toplam elektrik üretimi 24.353 TWh'dır, 1973 yılı için ise elektrik üretimi 6131 TWh'dır. 2016 yılında üretilen elektrik 1973 yılında üretilen elektrigin yaklaşık 4 katıdır. [4] Dünya elektrik tüketiminin 2030 yılına kadar 31.657 TWh'ye yükseleceği tahmin edilmektedir. [5] 2050 yılına kadar dünya elektrik ihtiyacının %20'sinden fazlasının rüzgar enerjisi ile karşılaşacağı tahmin edilmektedir. [6] 2030 yılına kadar AB, rüzgar enerjisi pazarına yaklaşık 20 milyar Euro yatırım yapacak ve bunun %60'ı açık deniz rüzgar pazarına yönelik olacak. [7] Rüzgar enerjisinin ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı, ekonomik büyümeyi teşvik edecek, iş fırsatı yaratacak, ulusal güvenliği artıracak, tüketicileri küresel yakıt piyasalarıyla ilişkili fiyat artışlarından veya arz kıtlığından koruyacak ve sera etkisine neden olan gezegeni ısıtan kırleticiyi ölçüde azaltacaktır. [5]

Dünyada fosil yakıt sınırlıdır ancak elektrik enerjisinin çoğu fosil yakıttan elde edilmiştir ve gelecekte dünya yakıt kriziyle karşı karşıya kalacaktır. [8] Bu nedenle, gelecekteki krizle başa çıkmak için rüzgar, güneş, biyokütle ve su enerjisi gibi yenilenebilir enerji ile elektrik enerjisi üretimini incelemek gerekmektedir. [9] Rüzgar enerjisi yerli, yurt dışından bağımsız, doğal ve sonsuzdur, gelecekte aynı miktarda elde edilir, asit yağmuru veya atmosferik ısınmaya neden olmaz, CO₂ salınımı yapmaz, doğaya ve insan sağlığına zarar vermez, fosil yakıt tasarrufu sağlar, radyoaktif etki yapmaz, hızlı teknolojik gelişme ve döviz kazandıran bir kaynaktır. [10-11]

Rüzgar ve diğer yenilenebilir kaynaklara yönelik genel eğilimler, 20. yüzyılın enerji krizlerinden sonra arttı. [12] Açık deniz rüzgar türbinleri endüstrisinin devam eden büyümesi ve açık deniz rüzgar türbinleri için temel teknolojisinin nispeten sınırlı gelişimi göz önüne alındığında, bu çalışma açık deniz rüzgar türbini temellerinden biri olan monopile tipi rüzgar türbinin yeniden tasarımları ve analizi yapılarak klasik tasarımlının aksine farklı bir yaklaşım ile daha ekonomik, kolay montaj edilebilen basit bir tek kazıklı deniz üstü rüzgar türbini modellemektedir. Bu makalenin açık deniz rüzgar türbini temellerinin gelecekteki araştırma ve geliştirmesi için fayda sağlama düşünlülmektedir.

2. Materyal Ve Yöntem

A. Materyal:

Bu makalede Monopile tipi bir deniz üstü rüzgar türbinleri hakkında detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu literatür araştırmasında deniz üstü rüzgar türbinlerinin incelenmesi, Offshore rüzgar türbinlerinin tarihçesi, deniz üstü rüzgar türbinlerinin temel yapıları ve çeşitleri ve gelecekte kurulması planlanan deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımları ve teknolojik gelişmeleri incelenmiştir. Literatür araştırması yapılrken deniz üstü rüzgar türbinleri üzerine yerli ve yabancı bilimsel makaleler ve dergiler araştırılmıştır. Bir deniz üstü rüzgar türbini tasarımları için gerekli teknik bilgiler için bu kaynaklardan faydalananmıştır. Literatür taramasında elde edilen veriler doğrultusunda, tasarım için gerekli teknik bilgiler toplanmış ve bir deniz üstü rüzgar türbini tasarımları bu verilere dayanarak modellenmiş ve analizi yapılmıştır. Tasarımları yapılan model klasik Monopile tipi rüzgar türbinlerinin dezavantajları incelenerek geliştirilmiştir. Rüzgar türbini tasarımları için gerekli matematiksel değerler Excel programı kullanılarak belirlenmiştir. Tasarım 3 Boyutlu modelleme programı CATIA'da modellenmiştir. Modellenen tasarım HyperWorks programında analizi gerçekleştirilmiştir.

B. Yöntem:

Literatür taramasından elde edilen veriler excel programında toplanmış ve incelenmiştir. Rüzgar türbini için gerekli kısıtlamalar ve düzenlemeler uluslararası standartlarda belirlenmiştir.

Bu uluslararası standartlar IEC 61400 (Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements), BS EN 50308 (Wind turbines. Protective measures. Requirements for design, operation and maintenance), ISO 19900 (General requirements for offshore structures), ISO/TC 67/SC 7 (Offshore structures), ISO 12494 (Atmospheric icing of structures) ve TS EN ISO 14122 (Safety of machinery) gibi standartlardan oluşmaktadır. Deniz üstü rüzgar türbini tasarımları yapılrken bu belirtilen standartlara uygun olarak modelleme yapılmıştır. Offshore rüzgar türbinleri boyutları üreticiden üreticiye değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan rüzgar türbini tasarımlında General Electric firmasının ürettiği 12MW Haliade-X direct-drive Offshore rüzgar türbinin toplam ağırlığı dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Bu rüzgar türbini 220 metre rotor açılığına sahiptir. Her biri 107 metre olan bir kanatın ağırlığı yaklaşık olarak 55 tondur. Nacel ağırlığı ise yaklaşık olarak 600 tondur. Toplam nacel, kanatlar ve Hub'ın ağırlığı ise yaklaşık olarak 850 tondur. Toplam 3 bölümden oluşan kule ağırlığı ise 837 ton ağırlığındadır. General Electric firmasının bu Offshore rüzgar türbini bir prototip olarak üretilip Rotterdam limanı Hollanda'da kullanıma alınmıştır. Tez kapsamında modellenen tasarımlının modellenmesi ve statik analiz şartları General Electric firmasının Haliade-X Offshore rüzgar türbini göz önüne alınarak tamamlanmıştır. Rüzgar türbinlerinde en önemli masraf kalemlerinden biri ise kullanılan çelik plakalarıdır. Elde edilen veriler excel programında detaylı bir şekilde incelenmiş ve tasarımda kullanılacak malzemelerin kalınlıkları optimize edilerek belirlenmiştir. Excel programında toplanan veriler CATIA 3 boyutlu tasarım programında modellenmiştir. Tasarımları yapılan modele HyperWorks programında analiz yapılmıştır. Deniz üstü rüzgar türbinlerinde bulunan dış çalışma platformları yukarıda belirtilen standartlara uygun olarak CATIA programında modellenmiştir. Tasarım yapılrken dış çalışma platformunun deniz seviyesinden yüksekliği önemli ve tasarımlı etkileyen bir faktördür. Bu tasarım çalışmasında kulenin kurulacağı bölgede maksimum 12 metre dalga yüksekliği kabul edilerek Kule Geçiş Parçası (Tower Transition Piece-TTP) ve dış çalışma platformu modellenmiştir.

TTP içinde bulunan kabinler ve iç platformlar için bir kafes yapı tasarımları yapılmıştır. Bu kafes yapının tasarımı uluslararası standartlara uygun olarak yapılmıştır. Dış çalışma platformu ve modelin içerisinde bulunan kafes yapının tasarımı CATIA programında analizi ise HyperWorks programında yapılmıştır.

3. Kule Geçiş Parçası Olmadan Tek Kazıklı Monopile Tipi Rüzgar Türbini

Bu çalışmada Tek kazıklı Monopile tipi deniz üstü rüzgar türbinlerinde TTP modülü kullanılmadan bir tasarım yapılmıştır. Tasarımın genel amacı monopile kullanılarak deniz/okyanus üzerine kurulan rüzgâr türbinlerinde, monopile yapısının doğrudan kule gövdesine irtibatlanmasını sağlamak ile ilgilidir.

Monopile tipi rüzgar türbinleri temel olarak 6 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler deniz/okyanus tabanına çakılan temel Monopile, Monopile ile Kule modüllerini birbirine bağlayan Transition Piece (Geçiş Parçası), Kule, Nacel, Hub ve Kanatlardan oluşmaktadır. Bu 6 temel modül kendi içerisinde karmaşık, ağır ve büyük yapılardır. Her 6 modül farklı tedarikçilerde/fabrikalarda üretilmektedir. Genel olarak montaj 6 modülün montajını fabrikada, limanda veya sahada deniz/okyanus' ta gerçekleştirilmektedir.

A. Tek Kazıklı Monopile Tipi Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Önceki Teknikler

Offshore rüzgâr türbinlerinin karaya kurulan rüzgâr türbinlerine göre en büyük dezavantajı nakliyat ve su üzerine kurulum maliyetinin yüksek olmasıdır. Bilinen teknikte deniz üstü (offshore) rüzgâr türbinlerinin bir çeşidi olan tek kazıklı rüzgar türbinlerinde, doğrudan bir temel atılmadan kazık (pile) sistemi üzerine kulenin sabitlenmesi ile kurulmaktadır. Tek kazıklı (monopile) ya da birden fazla kazıklı sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle monopile sistemlerde, kazık deniz/okyanus temeline çakılmakta, bahsedilen kazığın üzerine TTP sabitlenmekte ve bahsedilen TTP'nin üzerine ise kule sabitlenmektedir. Bahsedilen TTP üzerinde rüzgâr türbininin sahip olduğu temel komponentleri barındırmakta, üzerinde en az bir adet kapı ve platform yer almaktadır. Kulenin doğrudan kazık üzerine montajlanması mümkün olmamakta ve ekstra komponentler için de türbin üzerinde alana ihtiyaç duyulmaktadır.

Yukarıda anlatılan dezavantajlar sebebi ile özellikle offshore rüzgâr türbinlerinde, standart olarak kullanılan kazıkların (monopile) üzerine irtibatlanabilen kule yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Kuleyi oluşturan bölümlerden en alta yer alan kule parçası üzerinde yapılan yenilik ile geçiş parçasına ihtiyaç duyulmadan, bilinen teknikte kullanılan tek kazık yapısı üzerine türbin kurulumu yapılan yeni tasarım sayesinde mümkün olmaktadır. Bu yapı doğrudan kule üreticisi tarafından yapılabilmekte ve diğer kule parçaları ile birlikte nakliyesi sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak yukarıda bahsedilen tüm sorunlar, ilgili alanda bir yenilik yapmayı zorunlu hale getirmiştir. Yapılan tasarımında TTP modülünde bulunan tüm yapılar Kulenin en alt bölümünü adapte edilmiştir. Kulenin en alt bölümünü ise Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section-TTS) olarak adlandırılmıştır.

4. Geliştirilen Yeniliğin Tasarım Aşamaları

A. Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section) Tasarımı

Tasarıma başlamadan önce daha önce deniz üstü rüzgar türbinleri ve monopile tipi tek kazıklı rüzgar türbinleri hakkında detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımında modellenen modüllerin detaylı olarak gereksinimleri ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda deniz üstü rüzgar türbinlerinin tasarımlarında uyulması gereken uluslararası standartlar göz önünde bulundurulmuştur. Yabancı firmalar tarafından üretimi yapılmış TTP modülünün detaylı teknik resimleri incelenmiş ve modülün içerisinde bulunması gereklili olan parçalar belirlenmiştir. Tasarıma başlamadan önce General Electric firmasının ürettiği 12MW Haliade-X direct-drive Offshore rüzgar türbinin toplam ağırlığı dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Modellemeye başlamadan önce TTP'nin silindirik bölümünün dış çapı 6,5 metre olarak belirlenmiştir. Bu belirlenen dış çap müşterilerin gereksinimlerine göre değiştirilebilmektedir. Modelleme işlemine başlayabilmek için Monopile'ın kulenin bölümleri ile birbirine montajını sağlayabilmek için Flanş'larının teknik ölçülerinin belirlenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda kulenin yapısını oluşturulan çelik plakaların kalınlıkları ve yükseklikleri belirlenmesi gerekmektedir. Flanş ve çelik plakalara ek olarak deniz üstü rüzgar türbininde bulunması gereklili olan bir adet çelik plakadan imal edilen kapı teknik özellikleri excel

programında belirlenmiştir. Bu malzemelerin teknik ölçüleri excel programında maksimum ağırlık ve yükseklik kısıtları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Modellenecek kulenin bölümleri üretilebilirlik açısından maksimum ağırlık ve yüksek kısıtlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu modüllerin nakliyesi esnasında nakliye kısıtları dikkatlice incelenmelidir. Oluşturulan Flanş, Kapı ve çelik plakaların teknik özellikleri aşağıdaki tablodaki gibidir:

Table 1. Kule alt bölümü plaka teknik özellikleri.

BÖLÜMLER	PLAKA	MALZEME	KALINLIK (mm)	ALT KENAR DIŞ ÇAP (mm)	ÜST KENAR DIŞ ÇAP (mm)	YÜKSEKLİK (mm)
BÖLÜM 1	PLAKA 1	S355	80	6500	6500	2980
	PLAKA 2	S355	80	6500	6500	2980
	PLAKA 3	S355	80	6500	6500	2200
	PLAKA 4	S355	80	6500	6500	2980
	PLAKA 5	S355	80	6500	6500	2720
	PLAKA 6	S355	80	6500	6500	2585

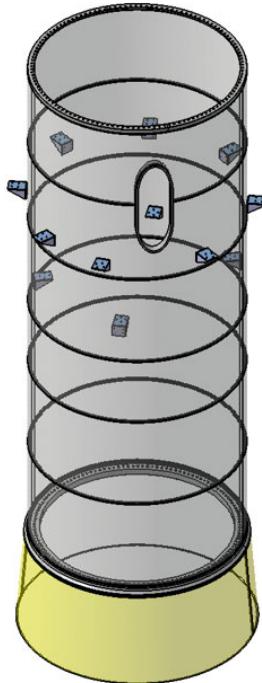
Table 2. Kule alt bölümü flanş teknik özellikleri.

		DIŞ ÇAP (mm)	İÇ ÇAP (mm)	DELİK ÇAPı (mm)	DELİK ADEDİ	YÜKSEKLİK (mm)
BÖLÜM 1	ALT FLANŞ	6500	6100	59	100	300
	ÜST FLANŞ	6500	6200	59	100	285

Table 3. Kule alt bölümü kapı teknik özellikleri.

	UZUNLUK (mm)	GENİŞLİK (mm)	KALINLIK (mm)	YÜKSEKLİK (mm)
KULE KAPISI	3000	1500	60	400

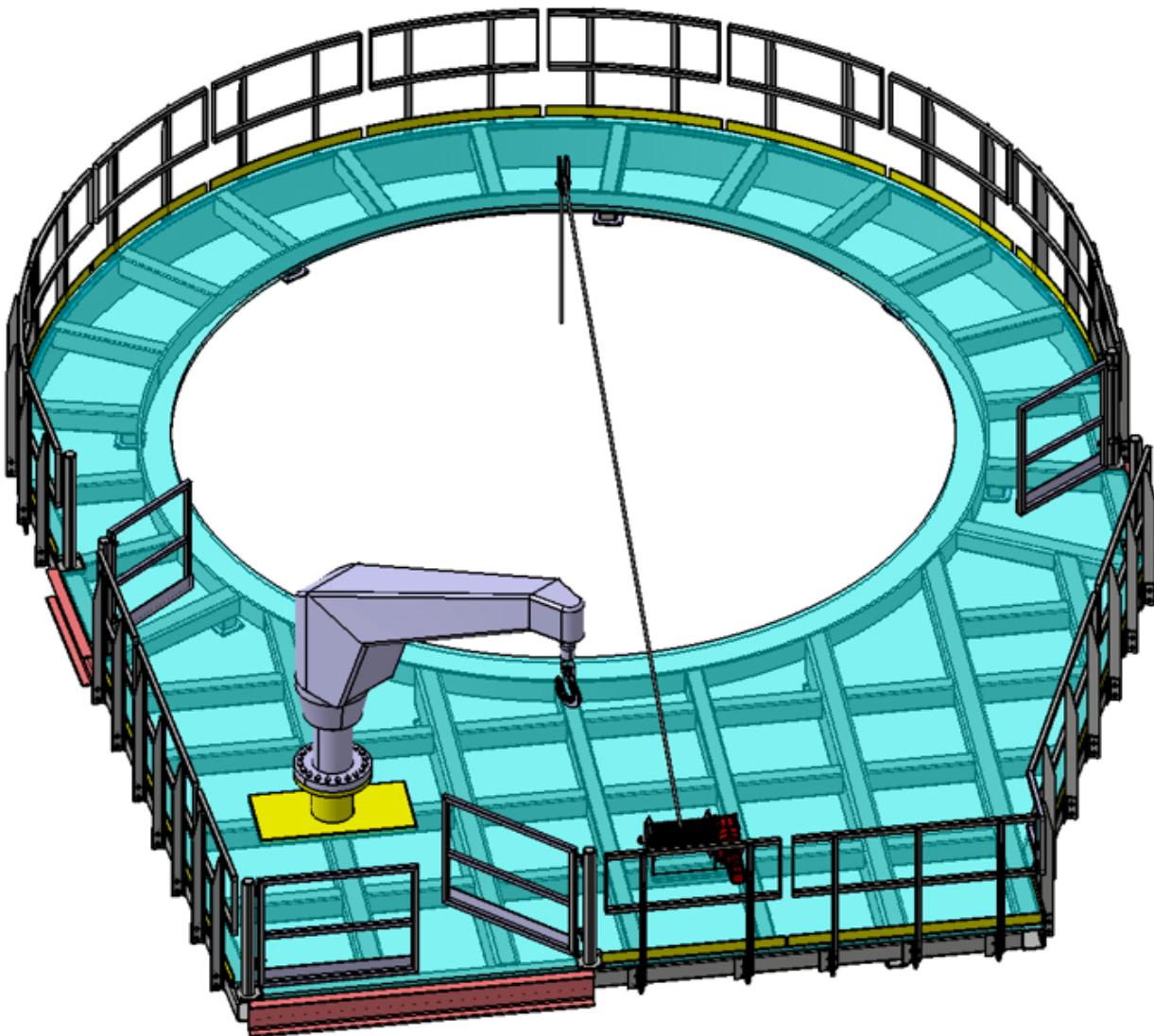
Yukarıda verilen çelik plaka, kapı ve flanş teknik özellikleri CATIA 3 boyutlu tasarım programı kullanılarak kule alt bölümü modellenmiştir. Deniz üstü rüzgar türbinlerinde iç ve dış çalışma platformları bulunmaktadır. Bu platformları desteklemek için alt kule bölümüne kaynaklı braketlerin tasarımını yapılmıştır. TTS modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 1. CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section).

B. Dış Çalışma Platformu (External Working Platform) Tasarımı

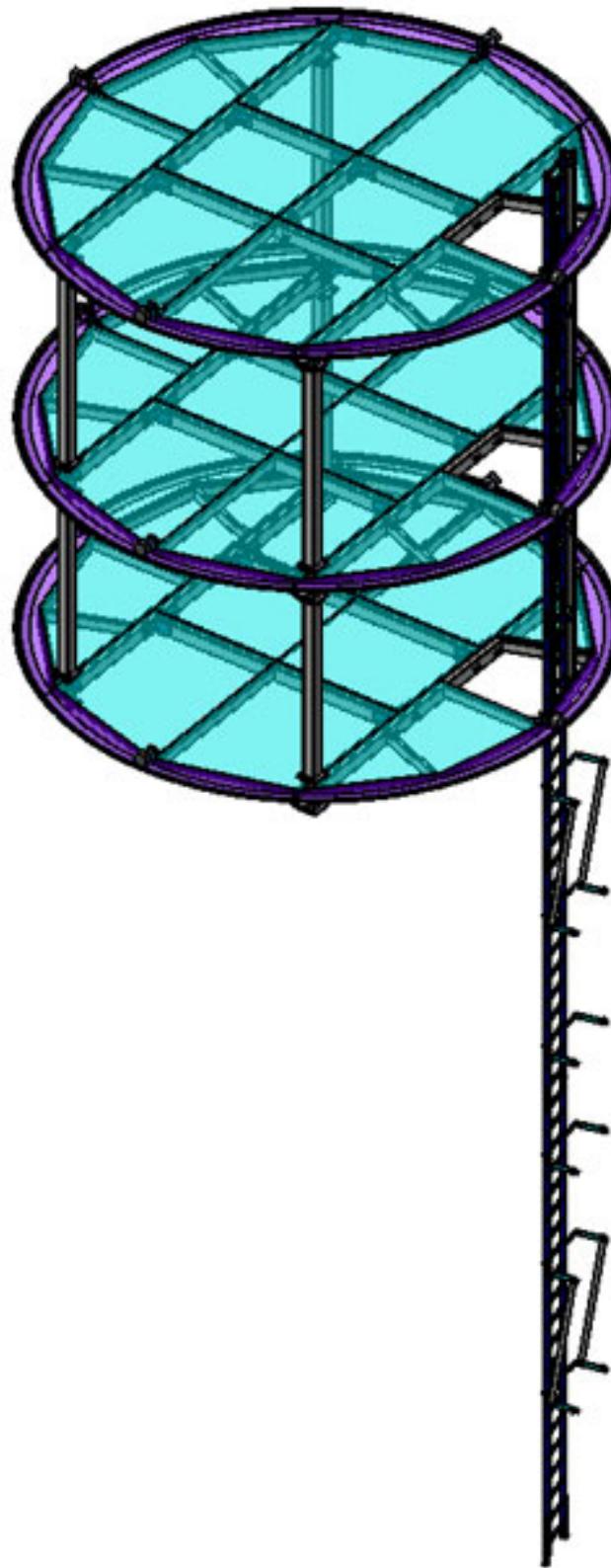
Deniz üstü (offshore) rüzgar türbinlerinde kurulum aşamasında, bakım, arazi ve kontrol işlemlerinin yapılabilmesi için deniz/okyanusta bulunan deniz üstü rüzgar türbinlerine ulaşım sağlanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle dış çalışma platformu (external working platform) olarak adlandırılan bir modülün bulunması gerekmektedir. Bu modül rüzgar türbini devreye alınması ve bakım işlemleri esnasında kuleye direk olarak ulaşım sağlanması sağlamaktadır. Bu yapının tasarımını yapabilmek için ilk olarak kulenin dikileceği bölgede oluşabilecek maksimum dalga boyu hesaplanması gerekmektedir. Çünkü bu dalgaların yıllar içerisinde bu dış çalışma platformuna zarar vermemesi gerekmektedir. Ayrıca bu yapıda korozyonun engellenmesi göz önünde bulundurulması gereken bir diğer önemli bir konudur. Bu modül önceki tekniklerde/tasarımlarda transition piece bölümünde yer almaktadır. Yapılan yeni tasarımda bu modül kule alt bölümüne adapte edilmiştir. Kabul olarak alınan maksimum dalga yüksekliği 12 metre olarak alınmıştır. Yeni geliştirilen tasarımda kule kapısı ve dış çalışma platformu maksimum 12 metre dalga boyundan etkilenmeyecek şekilde modellenmiştir. Dış çalışma platformunda kule alt bölümünde bulunan kapiya direk olarak ulaşım sağlanabilmektedir. Bu yapı kule alt bölümüne kaynaklı braketlere civata-somun bağlantısı sayesinde sabitlenebilmektedir. Eski teknikte bu yapı TTP üreticisi tarafından TTP modülüne direkt olarak kaynaklanmaktadır. Geliştirilen tasarımda kule üreticisinin bu yapıyı üretmesine ve kule alt bölümüne bağlaması gerekmektedir. Dış çalışma platformu başka firmalar tarafından üretilebilmesi için parçalı yapılar şeklinde bölünerek tasarımlı yapılmıştır. Bu parçalar istenirse limanda somun-civata bağlantısı sayesinde birbirine montajı gerçekleştirilebilir. Bir bütün haline gelen dış çalışma platformu istenirse limanda istenirse sahada kule alt bölümüne montajı gerçekleştirilebilmektedir. Geliştirilen yeni parçalı yapılar sayesinde bu parçaların imalatı kolaylaşmış ve nakliye kısıtları göz önünde alınarak tasarlandıkları için nakliye masraflarında iyileştirilme gerçekleştirilmiştir. Parçanın tasarımlı yapılarken dikdörtgen ve kare kutu profiller kullanılmıştır. Temel tasarım kısıtları ise uluslararası açık deniz petrol ve gaz platform tasarımlı standartları dikkate alınarak yapılmaktadır. Ayrıca dış çalışma platformunun boyutları ve gereksinimleri projeden projeye ve müşteriden müşteriye göre değişiklik göstermektedir. Yapılan dış çalışma platformu tasarımda 6,5 metre dış çapına sahip bir kule alt bölümüne göre tasarım yapılmıştır. Dış çalışma platformunda bir adet sabit vinç ve bir adet deniz tabanında bulunan kabloları çekilebilmesi için gerekli bir adet mobil vinç olmak üzere iki adet vinç bulunmaktadır. Dış çalışma platformunda çalışan personeli korumak amacıyla yapıya korkulukların modelleri eklenmiştir. Korkulukların tasarım kısıtları uluslararası standartlar dikkate alınarak yapılmıştır. Dış çalışma platformunda ayrıca personelin gezinebilmesi için profillere monte edilmiş ızgaralar (Gratings) bulunmaktadır. Dış çalışma platformu üzerinde bulunan tüm yapıların modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 2. CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform).

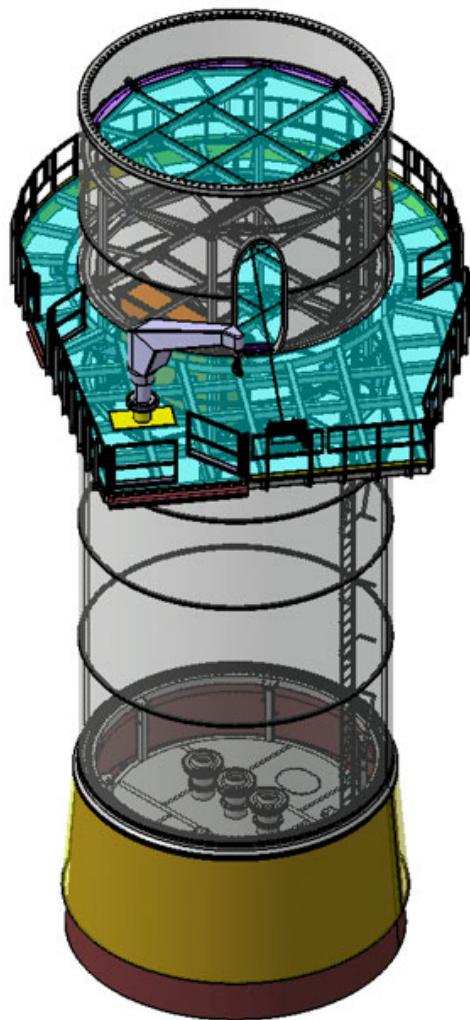
C. İç Kafes Platformu (Internal Cage Platform) Tasarımı

İç platformlar TTP içinde bulunan yapıları taşıması, kule içerisinde monopile'a ve nacel bölümüne ulaşım sağlama, kule bölümlerinin birbirine montajının sağlanması ve bakım işlemleri için gerekli bir yapıdır. Bu platformlar tek bir bütün olacak şekilde tasarımlı gerçekleştirilmiş ve bu yapıya iç kafes platformu adı verilmiştir. Tasarım aşamasında parçalar halinde modellenden kutu profiller nakliye şartları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu parçalar civata-somun bağlantısı kullanılarak birbirine montajı sağlanmaktadır. Bu parçalar daha küçük yapılar halinde modellendiği için üretimi kolaydır ve bir başka tedarikçi tarafından üretimi yapılmaktadır. Üretimi gerçekleştirilen küçük yapılar kule üreticisinde, limanda veya sahada kule alt bölümünde bulunan braketlere civata-somun bağlantısı kullanılarak montajı gerçekleştirilebilmektedir. Bu yapıda izgaralar (Gratings), ulaşım merdiveni ve kabinler bulunmaktadır. İç kafes platformu (Internal Cage Platform) üzerinde bulunan tüm yapıların modelleme işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 3. CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform).

Kule alt bölümü, Dış çalışma platformu ve İç kafes platformu modülleri ayrı ayrı parçalar halinde modellenerek tek bir montaj altında birleştirilmiştir. Tüm yapıların modelleme ve montaj işlemlerinden sonraki görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 4. CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) önden görünüşü.

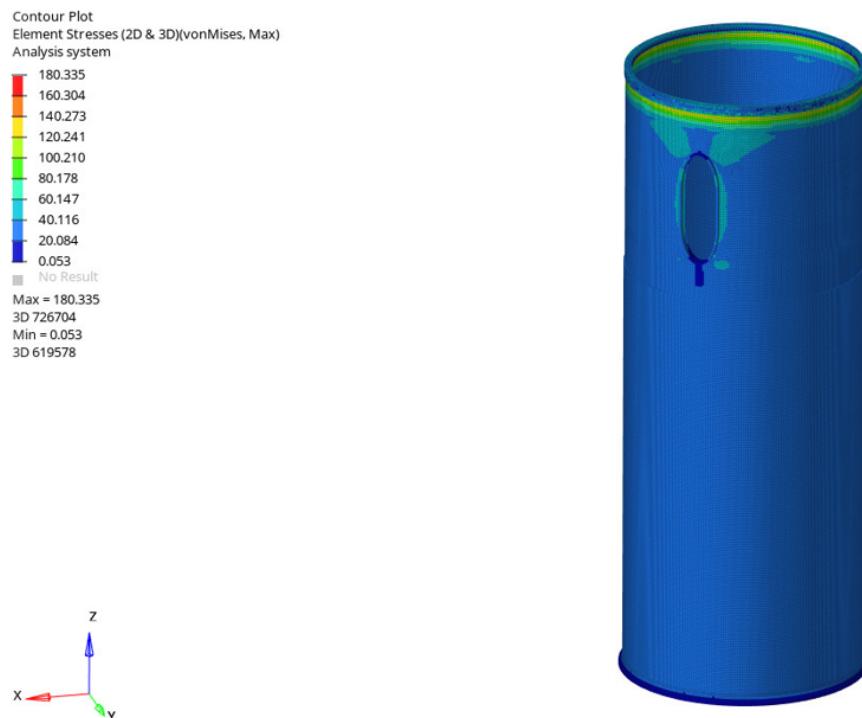
Kule alt bölümünde bulunan parçalar ve kule alt bölümü ile ilgili bölümler detaylandırılmış ve CATIA 3 Boyutlu tasarım programı kullanılarak modellenmiştir.

5. Geliştirilen Yeniliğin Statik Analiz Aşamaları

CATIA programında modellemesi tamamlanan kule alt bölümünün HyperWorks analiz programında statik analizi gerçekleştirilmiştir. Kule alt bölümü çelik plakalar, kapı ve flanşlar olarak düşünülerek, Dış çalışma platformu kutu profilleri bir bütün olarak, İç kafes platformu kutu profilleri bir bütün olarak düşünülerek ayrı ayrı statik analizi gerçekleştirilmiştir.

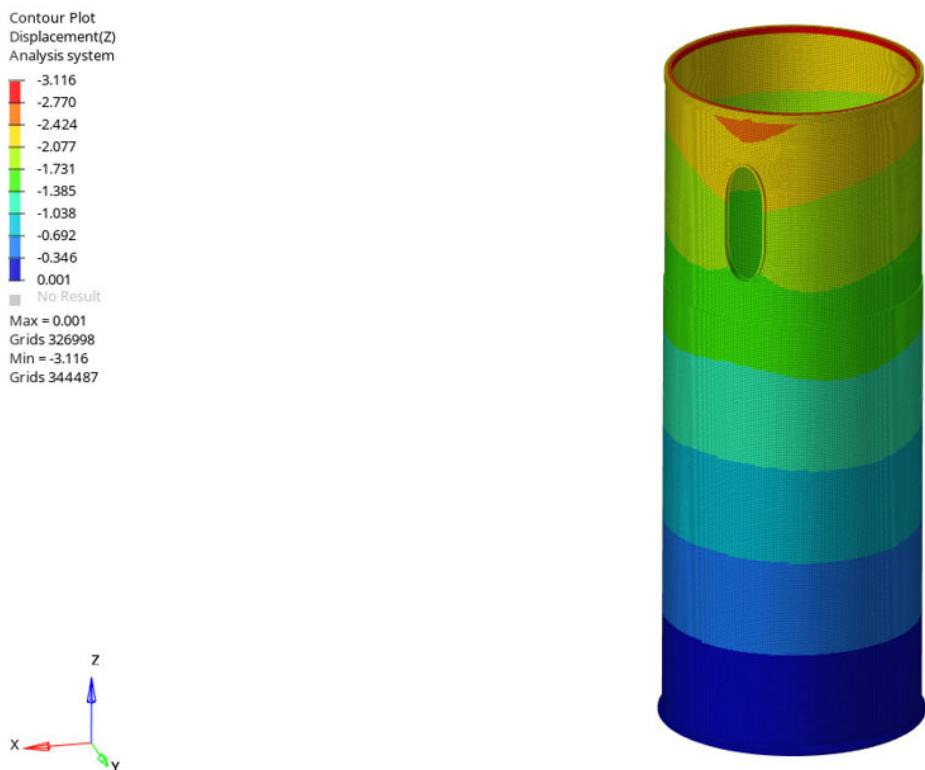
A. Kule Alt Bölümü (Tower Transition Section) Analizi

İlk olarak yapıya mesh atılmıştır. Çelik plaka ve kapıya dikdörtgen tipi meshler, Flanşlara ise üçgen tipi meshler tanımlanmıştır. Ortalama mesh boyutu ise 50 mm olarak belirlenmiştir. Mesh işleminden sonra yapılar arasında Freeze tipi kontak tanımlanmıştır. Tüm yapıların malzeme özelliği S355 olarak belirlenmiştir. Alt flanş alt yüzeyi tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. Üst Flanş üst yüzeyine 1687 ton statik yük uygulanmıştır. Yapının statik analiz sonuçlarının görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 5. HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) Von Mises stress değerleri.

Yapıda 1687 ton statik yük altında maksimum 180 Mpa stress değeri görülmüştür.

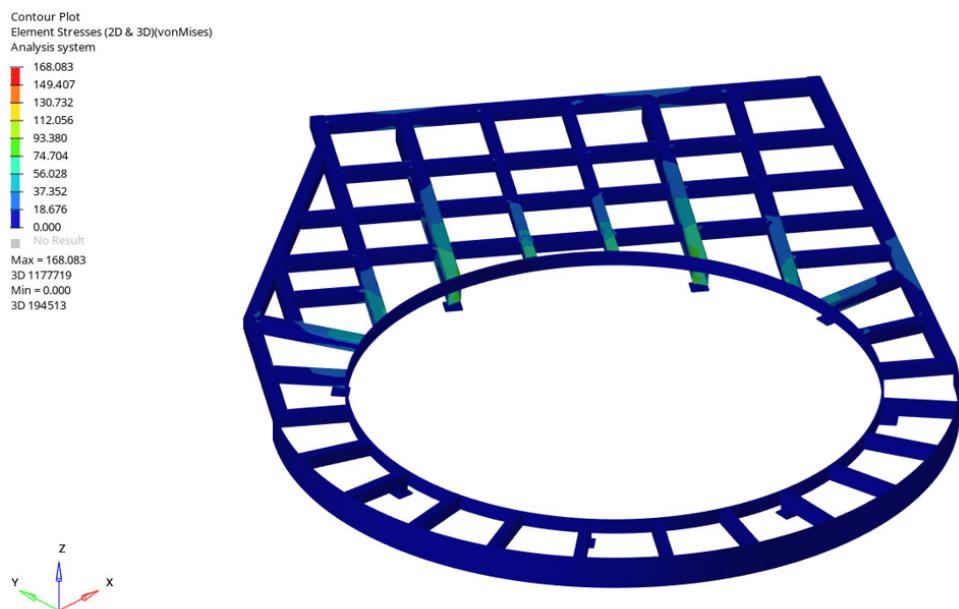


Şekil 6. HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen kule alt bölümü (Tower Transition Section) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

Yapıda 1687 ton statik yük altında maksimum 3,1 mm yer değiştirme görülmüştür.

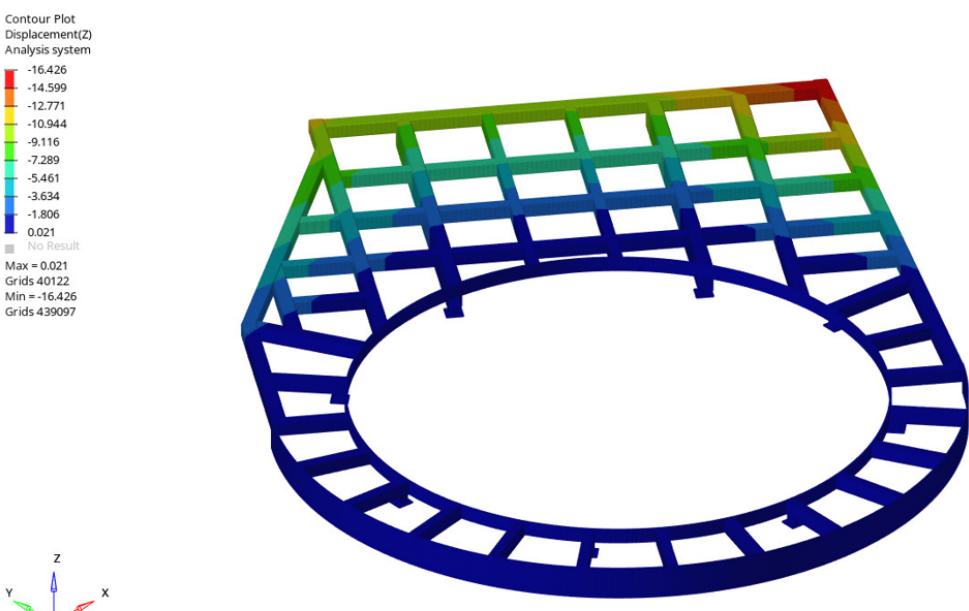
B. Dış Çalışma Platformu (External Working Platform) Analizi

Kutu profillere dikdörtgen tipi mesh tanımlanmıştır. Ortalama mesh boyutu ise 10 mm olarak belirlenmiştir. Mesh işleminden sonra yapılar arasında Freeze tipi kontak tanımlanmıştır. Tüm yapıların malzeme özelliği S355 olarak belirlenmiştir. Dış çalışma platformunun kule alt bölümünde bulunan braketlere temas eden yüzeyleri tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. Kutu profillerin üst yüzeyine 20 ton yük uygulanmıştır. Yapının statik analiz sonuçlarının görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 7. HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) Von Mises stress değerleri.

Yapıda 20 ton statik yük altında maksimum 168 MPa stress değeri görülmüştür.

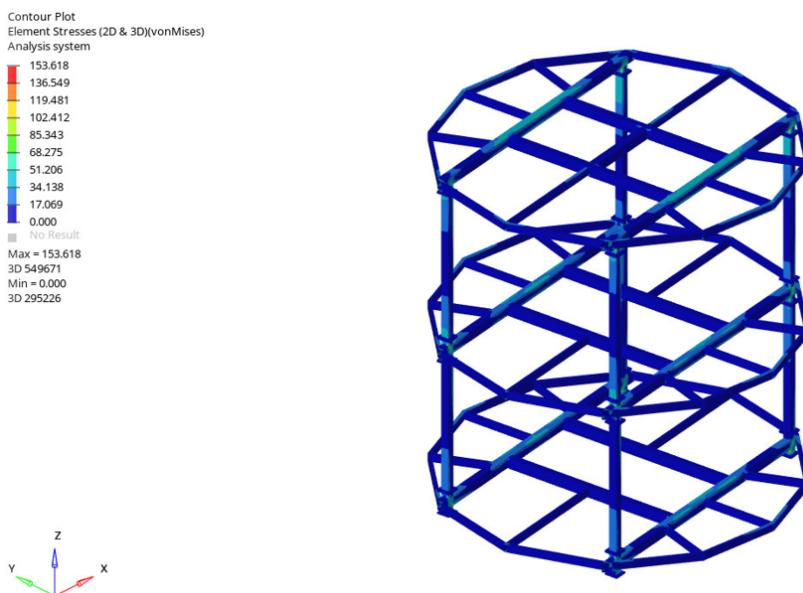


Şekil 8. HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

Yapıda 20 ton statik yük altında maksimum 16,4 mm yer değiştirme görülmüştür.

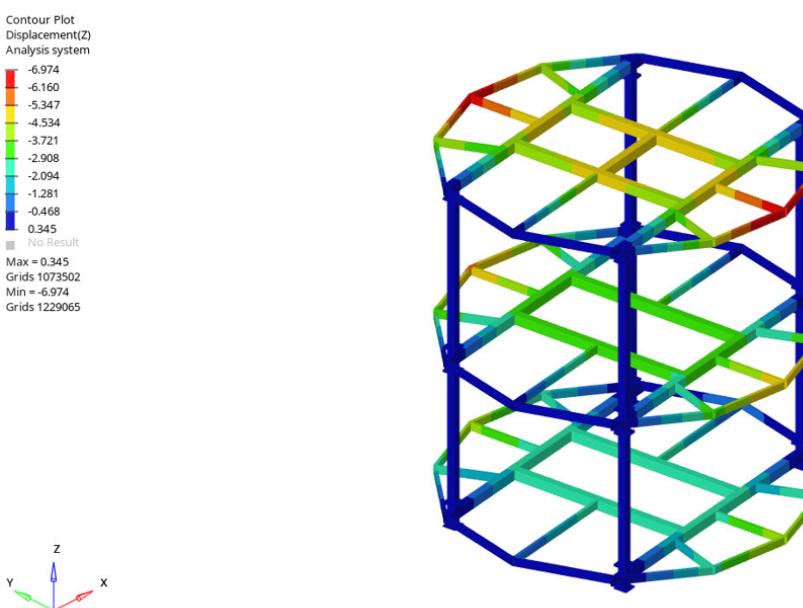
C. İç Kafes Platformu (Internal Cage Platform) Analizi

Kutu profillere dikdörtgen tipi mesh tanımlanmıştır. Ortalama mesh boyutu ise 10 mm olarak belirlenmiştir. Mesh işleminden sonra yapılar arasında Freeze tipi kontak tanımlanmıştır. Tüm yapıların malzeme özelliği S355 olarak belirlenmiştir. İç kafes platformunun kule alt bölümünün içerisinde bulunan braketlere temas eden yüzeyleri tüm serbestlik derecelerinde kısıtlanmıştır. 3 Farklı yükseklikte bulunan platformların her birine 5 ton, toplamda kutu profillerin üst yüzeyine 15 ton yük uygulanmıştır. Yapının statik analiz sonuçlarının görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 9. HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen dış çalışma platformu (External Working Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

Yapıda 15 ton statik yük altında maksimum 153 Mpa stress değeri görülmüştür.

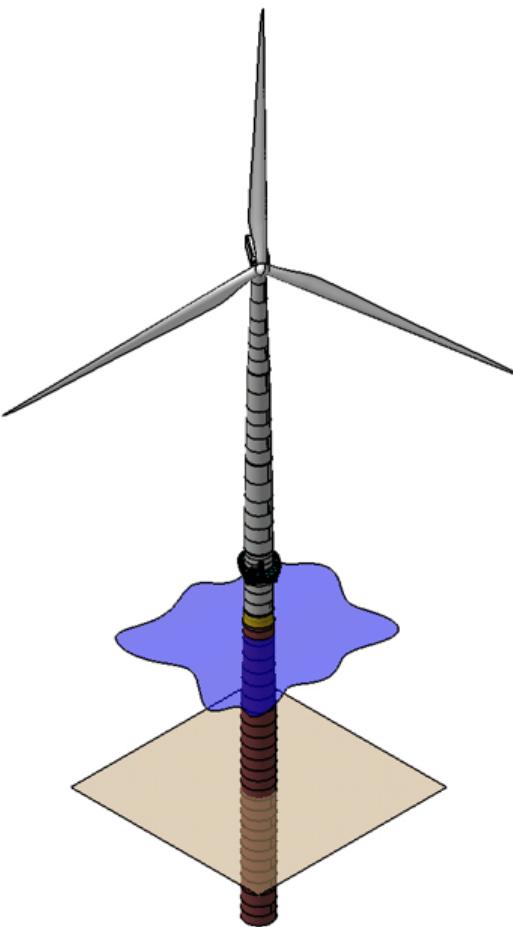


Şekil 10. HyperWorks programında statik analiz işlemi gerçekleştirilen iç kafes platformu (Internal Cage Platform) yer değiştirme (Displacement) değerleri.

Yapıda 15 ton statik yük altında maksimum 6,9 mm yer değiştirme görülmüştür.

6. Sonuç

Tasarımı yapılan kule geçiş parçasını görselleştirebilmek adına tek kazıklı deniz üstü rüzgar türbinlerinde bulunan diğer parçalar (Monopile, Nacel, Kule ve Kanatlar) tam boyutlu olarak modellenmiştir. Tek kazıklı monopile tipi bir rüzgar türbinin transition piece yerine TTS bulunduğu modelin görüntüsü aşağıdaki gibidir:



Şekil 11. CATIA programında modellemesi gerçekleştirilen tek kazıklı monopile tipi transition piece yerine kule alt bölümü (Tower Transition Section) modülü içeren bir deniz üstü (offshore) rüzgar turbini.

Yukarıdaki şekilde bulunan kahverengi yüzey deniz/okyanus tabanını, mavi yüzey deniz/okyanus yüksekliğini temsil etmektedir.

Geliştirilen tasarım, kule üst bölümünde diğer kule parçalarının montajına imkân tanıyan üst bağlantı bölümü içermekte, kule alt bölümünün alt bölgesinin iç kısmında kule ile kazığın (monopile) birbirine irtibatlanmasına imkân tanıyan alt bağlantı bölümü içermektedir. Dış çalışma platformunun seviyesinde konumlanmış en az bir adet kapı bulunmaktadır. Bu kapıya erişim sağlamak üzere, kule parçasından bağımsız kuleye sabitlenebilen en az bir adet dış çalışma platformu içermektedir. Kulenin iç bölümüne erişim sağlamakaya imkân tanıyan, kule alt bölümünden bağımsız kulenin iç kısmına sabitlenebilen en az bir adet iç kafes platform içermesi ile karakterize edilen deniz/okyanus üzerinde kullanıma uygun, tek kazık rüzgâr türbinlerinde kullanıma uygun geçiş parçasına ihtiyaç duyulmadan kule montajına imkân tanıyan kule parçası ile ilgilidir.

Bu çalışmada, klasik tek kazıklı deniz üstü rüzgâr türbinlerinin bir tipi olan uygulamalarda, kazık ile kule arasında geçiş parçası kullanıma ihtiyaç duyulmadan, kulenin dış kısmında yer alan platformun ve iç kısmında yer alan iç platformun parçalar halinde nakliye edilerek kule üreticisinde, limanda veya sahada kule üzerine montajlanmasına imkân tanınmaktadır. Bu sayede geçiş parçasının tek parça olarak nakliyesinin ve kurulumunun getirdiği dezavantajlar ortadan kaldırılmaktadır.

REFERENCES

- [1] Ahmet Duran Şahin, Progress and recent trends in wind energy, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 30, Issue 5, 2004, Pages 501-543.
- [2] TUSİAD, 1998, “21. yy. Girerken Türkiye’nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi” TUSİAD-T/98-12/239.
- [3] Zhiyu Jiang, Installation of offshore wind turbines: A technical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 139, 2021.
- [4] International Energy Agency. Key world energy statistics; 2017.
- [5] Saidur R, Islam M, Rahim N, Solangi K. A review on global wind energy policy. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:1744–62.
- [6] Tabassum A, Premalatha M, Abbasi T, Abbasi SA. Wind energy: increasing deployment, rising environmental concerns. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;31:270–88.
- [7] EWEA. The economics of wind energy; 2009. (<http://www.ewea.org>).
- [8] IEA, The International Energy Agency (IEA): World energy outlook. Medium- Term Oil and Gas Market Reports. Website: <http://csis.org/event/iea-2009- medium-term-oil-and-gas-market-reports>.
- [9] Güler O . Wind energy status in electrical energy production of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13(2):473–8.
- [10] Kaygusuz K. Wind power for a clean and sustainable energy future. *Energy Sources Part B* 2009;4:122–33.
- [11] Kaygusuz K. Developing wind energy in the European Union. *Energy Sources Part B* 2006;1:9–21.
- [12] Sayigh, A. 1999. Renewable energy—The way forward. *Applied Energy* 64,15–30.